

## Résumé

*L'évolution des profils hydriques des sols de palmeraie est suivie, pendant une phase de dessiccation puis de réhumectation, par une sonde radiométrique neutronique et gammamétrique, programmable et automatique. Des échantillons de sol, prélevés lors de l'installation, servent à des étalonnages gravimétriques. Des prélèvements par anneaux, sur front de fosse, permettent de réaliser un étalonnage densimétrique. Au début de la saison des pluies, les racines prélèvent référentiellement l'eau dans les horizons superficiels, puis de plus en plus profondément. Le rôle des remontées capillaires, qui n'a pu être clairement mis en évidence, est cependant fortement suspecté. Ces observations permettent de déboucher sur des calculs de bilans hydriques, de l'évolution des quantités d'eau disponible au cours du temps et des prélèvements réalisés par la palmeraie en fonction du régime de pluviosité sur la plantation.*

## Abstract

*Variations in the water profiles of soils under oil palm were monitored during a drying out phase followed by rehydration, using a programmable and automatic neutron and gamma ray radiometric probe. Soil samples taken when the probe was installed were used for gravimetric calibration. Slices taken from trench walls were used for densimetric calibration. At the beginning of the rainy season, the roots took up water primarily from the surface horizons, then from deeper and deeper down. Though it could not be clearly demonstrated, capillary rise was strongly suspected of playing a role. These observations were used to calculate water balances and the changes in the amount of water available over time, along with the quantities taken up by the oil palm planting depending on the rainfall pattern at the plantation.*

## Resumen

*Se sigue vigilando la evolución de los perfiles hídricos de los suelos de palmeral, durante una fase de desecación y luego de rehumectación, con una sonda radio métrica neutrónica y gamma métrica, programable y automática. Muestras de suelo sacadas en la instalación sirven para patrones gravimétricos. Sacar muestras mediante anillos en frente de zanja permite realizar un patrón densimétrico. En principio de temporada de lluvias, las raíces sacan de modo referencial el agua en los horizontes superficiales, y luego cada vez más profundamente. El papel de las subidas capilares, que no se ha podido evidenciar claramente, es no obstante fuertemente sospechado. Estas observaciones permiten llegar a cálculos de balances hídricos, de la evolución de las cantidades de agua disponible en el transcurso de las tomas de muestras realizadas por el palmeral acorde al régimen de pluviosidad en la plantación.*

# Profils hydriques et alimentation en eau du palmier à huile en Côte d'Ivoire

Rey H.<sup>1</sup>, Quencez P.<sup>2</sup>, Dufrêne E.<sup>3</sup>, Dubos B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CIRAD-GERDAT-AMAP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

<sup>2</sup> CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

<sup>3</sup> Laboratoire d'écologie végétale, faculté des sciences, université Paris XI Orsay, Bat. 362, 91405 Orsay Cedex, France

L'alimentation hydrique est le principal facteur limitant de la production du palmier à huile en Afrique de l'Ouest. Dès les années 50, de nombreuses études ont été entreprises sur le sujet (Michaux, 1951 ; Wormer et Ochs, 1959), poursuivies par Ochs (1963) et Quencez (1968). Puis, l'Irho<sup>(1)</sup> (Anon., 1969) a entrepris une approche systématique du fonctionnement du palmier à huile avec Ochs *et al.* (1988), Dufrêne (1989) poursuivie par le programme palmier à huile du Cirad-cp<sup>(2)</sup>. Dans cette approche, les études sur l'alimentation en eau du système palmeraie sont primordiales. Cette étude est conduite sur une parcelle d'expérience de la station de La Mé en Côte d'Ivoire. Outre les facteurs climatiques et les observations sur les palmiers, les profils hydriques du sol sont suivis, chaque semaine, par des mesures à l'aide d'un humidimètre à neutrons dans des puits jusqu'à 5 m de profondeur. La mise en œuvre de la sonde à neutrons pour mesurer l'humidité volumique (HV) des sols, couplée à une sonde gamma pour mesurer leur densité apparente, a nécessité une étude de méthodologie d'étalonnage dont les résultats ont été utilisés dans l'étude des profils hydriques (Rey, 1989a). Un bilan hydrique a été établi au moyen des variations de stocks d'eau du sol (Rey, 1989b). Des esti-

mations de l'évapotranspiration réelle (ETR) du couvert en ont été déduites. Le domaine d'eau disponible (DED) a été calculé dans les conditions d'observations. L'évolution de la réserve en eau du sol (RU) est étudiée au cours des phases de dessiccation puis de réhumectation. La réaction des palmiers à l'état hydrique du sol est jugée grâce aux mesures de conductance stomatique (gs). On estime la réserve facilement utilisable (RFU) en fonction du DED. Les caractéristiques physiques des sols et les profils racinaires jusqu'à 5 m de profondeur apportent les éléments pour vérifier les hypothèses faites sur les résultats de rétention d'eau par le sol et sur la consommation en eau et le comportement des palmiers.

## Dispositif, matériel et méthodes

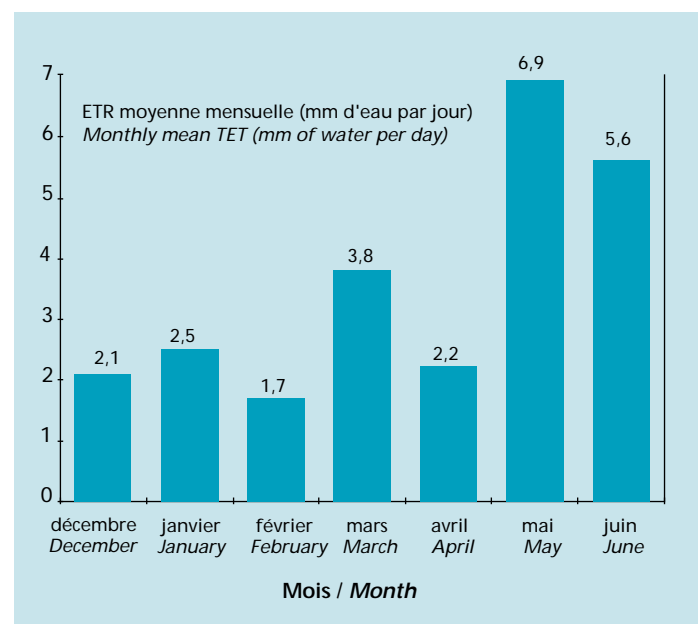
La parcelle élémentaire choisie pour cette étude appartient à une plantation E70 (1973), plane et homogène sur sols ferrallitiques acides sableux, représentatifs des sédiments tertiaires de Côte d'Ivoire. Elle contient 16 arbres utiles de la lignée LM2T x DA10D, largement représentée au sein du réseau expérimental et dans les plantations commerciales et villageoises.

Les profils hydriques ont été mesurés au pas de 10 cm et généralement au rythme hebdomadaire à l'aide d'une sonde radiométrique Nardeux modèle SOLO 40. On disposait de tubes d'accès en aluminium en-

<sup>1</sup> Ex-Institut de recherches pour les huiles et oléagineux.

<sup>2</sup> Département des cultures pérennes du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

foncés verticalement : 12 d'entre eux, de 3 m de long, étaient implantés pour étudier d'éventuelles variations spatiales au sein du dispositif de plantation en triangles équilatéraux ; un tube (T13) de 6 m placé au centre d'un triangle a complété cette série lorsque l'on s'est aperçu que le palmier était capable de s'alimenter en eau à une profondeur notablement supérieure à 3 m. On se limitera ici à l'étude des résultats du tube T13 car il a été vérifié (Rey, 1989b) que les variations d'humidité mesurées dans ce tube étaient comparables à celles mesurées dans les 12 tubes de 3 m dans leur partie commune. La sonde radiométrique SOLO 40 utilise deux sources de rayonnement (neutrons et gamma), un capteur sensible à l'humidité volumique et un autre à la densité apparente du sol. Les méthodes d'étalonnage et de calcul proposées par le constructeur Nardeux et le Centre d'énergie atomique Cadarache, établis pour des sols des régions tempérées, nécessitaient un contrôle de la fiabilité pour leur application au cas des sols tropicaux et, en particulier, du sol ferrallitique où l'expérimentation se situait. Rey (1989a) a réalisé l'étude méthodologique d'étalonnage. Les observations faites sur les carottes de sol lors de la pose du tube d'accès de 6 m, puis dans la fosse pédologique de 6 m de profondeur située à proximité et, enfin, dans le tube, ont servi à établir des corrélations entre, d'une part les résultats de mesure d'humidité pondérale et de densité apparente, d'autre part les comptages neutroniques et gammamétriques. Les résultats de cet étalonnage gravimétrique ont été préférés pour l'application à l'étude générale. Sur la même fosse pédologique, le profil racinaire des palmiers a été réalisé en effectuant quatre répétitions de prélèvements de tranches de sol de 10 cm d'épaisseur (volume unitaire 4 dm<sup>3</sup>) au pas de 10 cm. Les poids secs des racines primaires (RI), secondaires (RII) et d'ordre supérieur (RIII + RIV) ont été pesés. Les échantillons pédologiques moyens par horizon homogène ont été constitués à fin d'analyses des caractéristiques physiques. Le comportement hydrique des palmiers voisins du tube T13 a été étudié au rythme hebdomadaire, simultanément à l'humidité du sol, en mesurant les conductances stomatiques (Dufrêne *et al.*, 1992) à l'aide d'un poromètre DeltaT Devices modèle MKII. Au cours de chaque journée d'observations, ces dernières ont été réalisées au moins cinq fois sur deux folioles de la partie centrale des feuilles de rang 7, 8, 9 - 16, 17, 18 - 24, 25, 26, soit à



**Figure 1.** Evapotranspiration (ETR) moyenne mensuelle de la parcelle d'observation E70. Monthly mean evapotranspiration (TET) in observation plot E70.

trois niveaux dans la couronne et selon trois directions sur un palmier.

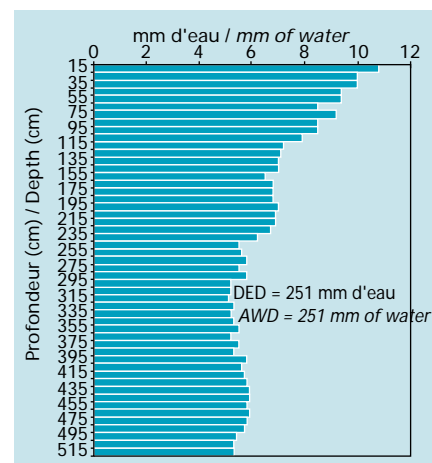
### Bilan d'eau - évapotranspiration réelle (ETR)

Pendant toute la durée de la grande saison sèche 1988 jusqu'au début du mois de mai, le profil se dessèche en continu de la surface vers la profondeur (tableau 1) et ne peut permettre qu'une circulation d'eau non saturante dans le sens ascensionnel. Du 10 mai au 7 juillet 1988, les fortes précipitations du début de la grande saison des pluies réhumectent le profil en surface puis en profondeur sans que le front de réhumectation n'atteigne jamais la profondeur de 5,15 m, limite d'observation. Jusqu'au 7 juillet 1988 il est donc possible, en l'absence de perte d'eau par drainage, d'estimer l'évapotranspiration (ETR) de la palmeraie entre deux dates d'observations en ajoutant la quantité d'eau apportée par les pluies (P) à celle qui a été prélevée dans le sol. Cette dernière est évaluée par différence des quantités d'eau (D stock) contenues dans le profil de sol entre l'origine et la fin de la période considérée (calcul en millimètre) :

$$ETR = P - (D \text{ stock})$$

Il s'agit cependant d'une estimation par défaut, car l'étude des profils de dessèchement du sol montre qu'il existe des prélèvements d'eau au-delà de 5,15 m, dont il n'est pas possible de tenir compte faute de mesures.

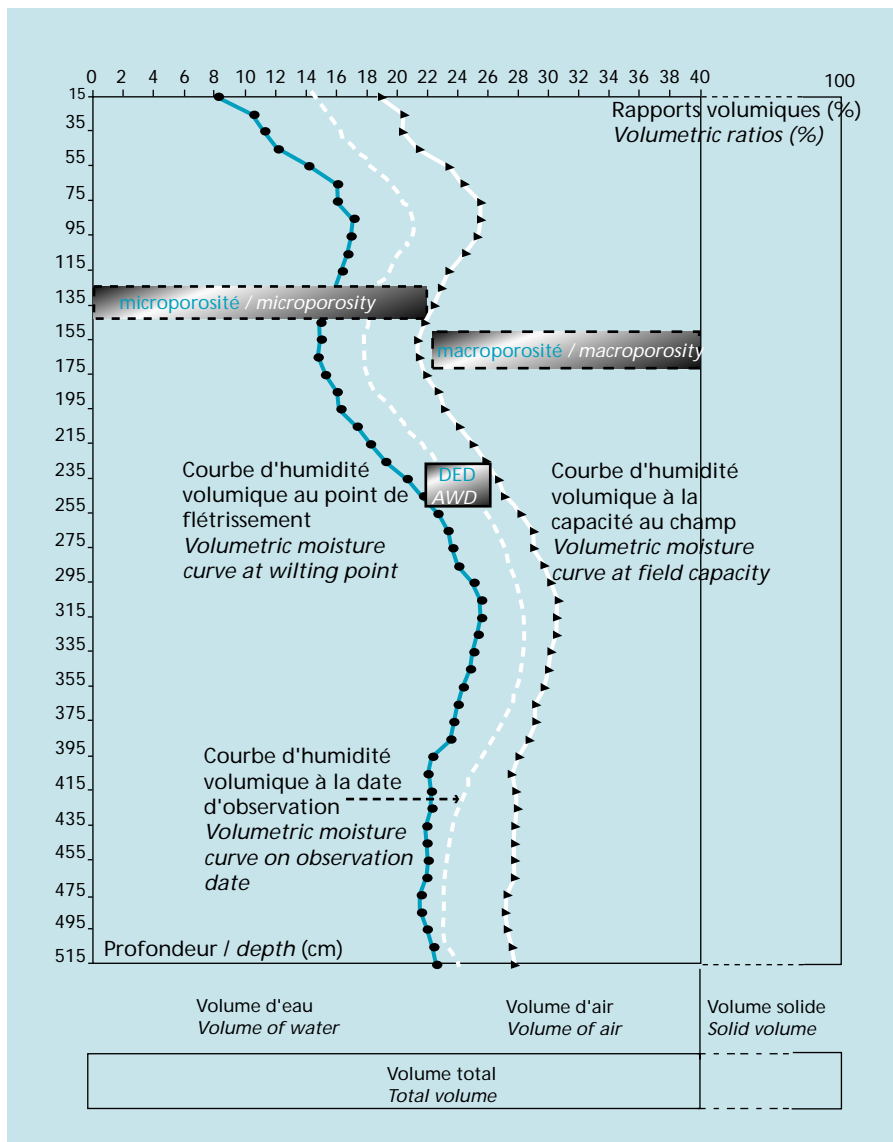
L'ETR ainsi calculée sur une base hebdomadaire (tableau 1, page 55), varie de 0,6 à



**Figure 2.** Domaine d'eau disponible (DED) pour les sols de la parcelle d'observation E70. Available water domain (AWD) for soils in observation plot E70.

4,6 mm j<sup>-1</sup> au cours de la saison sèche, autour d'une valeur moyenne de 2,5 mm j<sup>-1</sup>. Elle augmente avec l'arrivée des fortes pluies, pour prendre des valeurs anormalement élevées qu'il n'est pas possible d'accepter (10,7 mm j<sup>-1</sup> par exemple du 26 mai au 02 juin). Il faut admettre que l'estimation de l'ETR par cette méthode est alors biaisée par des pertes d'eau de pluie par ruissellement et/ou drainage profond, malgré l'absence de pente notable dans la parcelle d'observation.

Il faut donc se limiter aux ETR mesurées en saison sèche (figure 1 pour une base mensuelle), avant que le bilan ne soit faussé par ruissellement, ou plus tard par drainage. Ces ETR de saison sèche sont heureusement les plus intéressantes, car elle permettront



**Figure 3.** Grandeurs physiques et hydriques caractéristiques des sols de la parcelle d'observation E70.  
Typical physical and hydric values for soils in observation plot E70.

par la suite d'étudier l'effet de la résistance opposée par la plante à l'évapotranspiration du couvert végétal (mesure de la conductance stomatique).

## Domaine d'eau disponible (DED)

Rappelons que la quantité d'eau du sol utilisable pour l'alimentation des plantes est appelée domaine d'eau disponible (DED). Elle correspond au stock d'eau compris entre la capacité au champ (cc) et le point de flétrissement (pf) sur l'épaisseur de sol accessible aux racines :  $DED = HV_{cc} - HV_{pf}$ .

La capacité au champ (cc) correspond à l'humidité résiduelle d'un sol saturé d'eau, après écoulement gravitaire de l'eau libre.

Le profil hydrique correspondant a été estimé en prenant le profil de ressuyage obtenu après une période très pluvieuse suivie de six jours sans pluie.

Le point de flétrissement (pf) correspond à l'humidité au-dessous de laquelle les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol retenue par des tensions de l'ordre de 16 bars (pF 4,2). Le profil hydrique correspondant a été estimé dans un premier temps en prenant, pour chaque profondeur, l'humidité minimale atteinte au cours de la saison sèche 1988.

Pour cette première approche, la quantité d'eau comprise entre ces deux profils a été considérée comme étant le DED (figure 2). La figure 3 illustre la répartition en volume des diverses phases constituantes du

sol (solide, eau, air) en admettant une porosité constante égale à 40 % (porosité calculée avec une densité réelle estimée à 2,6 et une densité apparente constante de 1,6).

$$\text{Porosité moyenne} = 100 \cdot (2,6 - 1,6) / 2,6 = 40 \%$$

Le DED, maximum en surface avec 10 mm de réserve environ par 10 cm de sol, diminue progressivement jusqu'à environ 2 m de profondeur pour ensuite rester stable autour de 4 à 5 mm par 10 cm de sol (figure 2). Sur l'ensemble du profil, la réserve totale se monte à 251 mm d'eau jusqu'à 5,15 m de profondeur, à laquelle il faudrait ajouter la quantité d'eau que la palmeraie est capable de prélever au-delà, mais qu'il n'est pas encore possible d'estimer.

## Evolution de la réserve utilisable (RU)

Si l'on exprime maintenant l'humidité du sol en % du DED, on obtient une valeur plus représentative de la tension avec laquelle cette eau est retenue par le sol. Ce type de représentation des profils hydriques rend plus facilement compte des contraintes d'absorption rencontrées par les racines.

La réserve utilisable (RU) se définit comme le pourcentage du DED utilisable par la plante. Elle diminue régulièrement de 70,2 % à 1,4 % entre le 15 décembre 1987 et le 26 avril 1988 avec un petit épisode de remontée en mars (tableau 1, voir page 320), suite à quelques pluies totalisant environ 100 mm. La phase de réhumectation de la grande saison des pluies suit ce dessèchement. La RU culmine à plus de 100 % le 11 juillet 1988 avant la phase de drainage qui l'amène à la capacité au champ le 16 juillet 1988. Un nouveau cycle de dessèchement apparaît et correspond à l'amorce d'une petite saison sèche dès le 21 juillet 1988.

Le premier profil (figure 4A) se trouve être à environ 70 % du DED sur l'ensemble.

Le profil se dessèche progressivement en l'absence de pluie pour prendre une forme oblique presque rectiligne dont la pente augmente avec le temps (figure 4B).

Les prélèvements d'eau sont donc proportionnellement plus importants en surface qu'en profondeur, et ceci malgré le gradient décroissant de tension qui en résulte.

Lorsque les horizons de surface atteignent le minimum d'humidité, les prélèvements d'eau ne s'effectuent plus qu'en profondeur, jusqu'à consommation totale ou presque du DED (figure 4C).



**Figure 4.** Evolution des profils de réserve utile entre le 11-12-1987 et le 28-07-1988. / *Changes in useful reserve profiles from 11-12-1987 to 28-07-1988.*

Les premières pluies réhumectent la partie supérieure du profil (figure 4D).

Le front de réhumectation progresse ensuite vers la profondeur (figures 4E et 4F), tandis que les prélèvements d'eau s'effectuent à nouveau préférentiellement dans les horizons superficiels (figure 4G).

## Conductances stomatiques (gs)

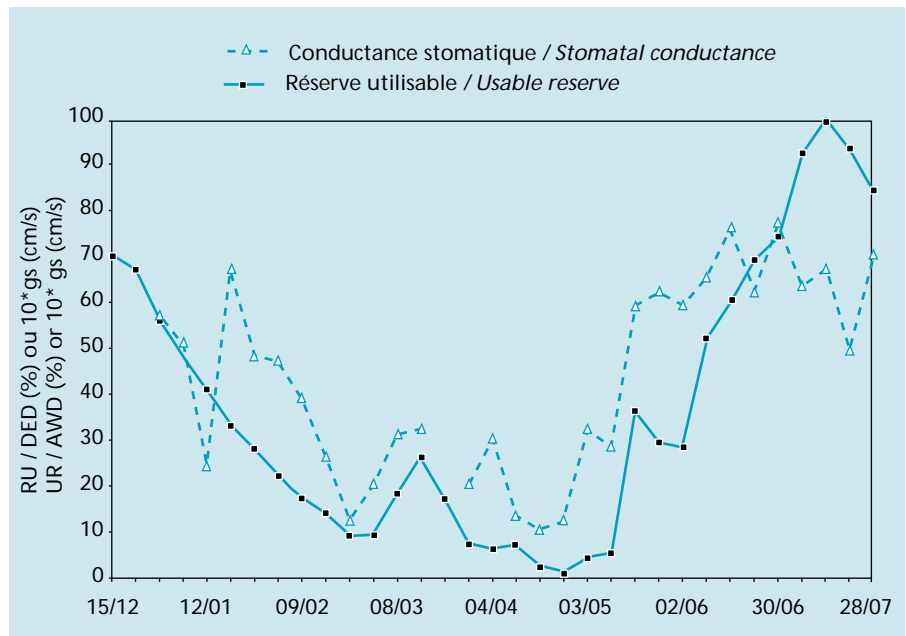
Les moyennes journalières des conductances stomatiques (sur la palme de rang 17 représentative des variations) varient conjointement à la réserve en eau du sol (figure 5), avec quelques irrégularités. Certaines d'entre elles ont pour cause un effet du déficit de saturation en eau de l'air (VPD) sur l'ouverture stomatique (Dufrène, 1989). C'est le cas, par exemple, de la journée du 12 janvier 1988 pendant laquelle l'harmattan, vent sec du Sahara qui n'affecte le sud de la Côte d'Ivoire que quelques jours par an, a provoqué une fermeture partielle des stomates. D'autres irrégularités sont liées à l'incidence de petites pluies de saison sèche qui réhumectent la partie supérieure du profil et induisent une réouverture temporaire des stomates sans modifier sensiblement l'état des réserves en eau du sol.

Les variations observées de la conductance stomatique en fonction de la réserve en eau du sol (figure 6) montrent qu'en pratique la conductance stomatique moyenne journalière reste voisine d'un maximum entre 6 et 8 mm s<sup>-1</sup> jusqu'à ce que la réserve en eau du sol atteigne un seuil entre 30 et 40 % du DED. Au-delà, elle diminue très vite pour atteindre une valeur voisine de zéro lorsque le DED est entièrement consommé (RU = 0).

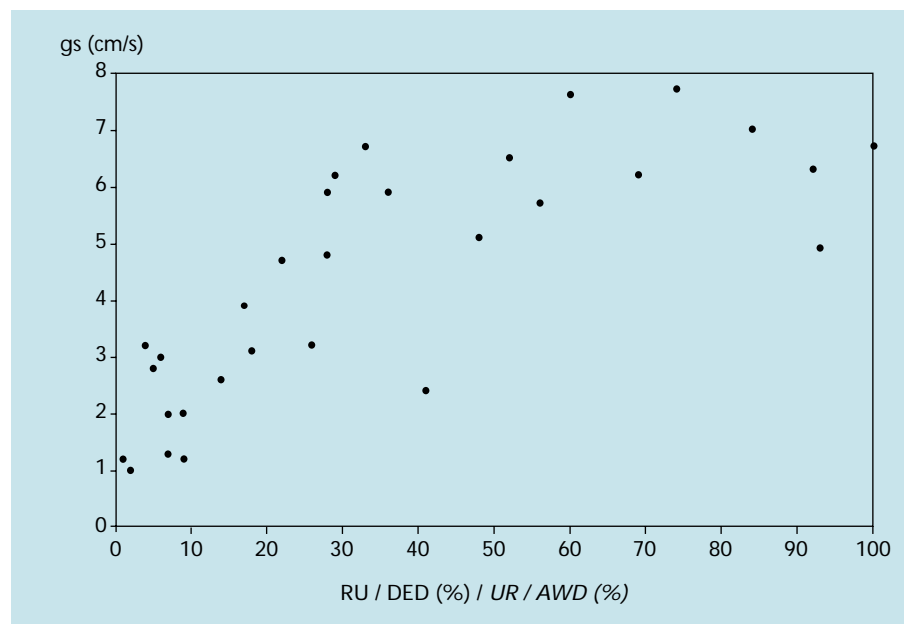
La réserve facilement utilisable (RFU) est la part de la réserve en eau (RU) que la palmeraie peut utiliser sans que les échanges gazeux feuille - atmosphère soient sensiblement affectés (transpiration, respiration et photosynthèse). La RFU serait donc d'environ 70 % du DED dans les conditions de l'expérimentation, soit 175 mm d'eau. Elle serait, ainsi, légèrement inférieure à la réserve de 200 mm retenue dans le modèle simplifié du bilan de l'eau utilisé jusqu'à présent par le programme palmier du Cirad (Surre, 1968).

## Analyses de sols

Il existe une très bonne corrélation entre les humidités au pF 4,2 mesurées au laboratoire et les taux d'argile du profil (Olivin et



**Figure 5.** Evolution de la réserve utilisable (T13) et des conductances stomatiques (parcelle d'observation E70) au cours du temps. / Variations in the usable reserve (T13) and stomatal conductance values (observation plot E70) over time.



**Figure 6.** Variations de la conductance stomatique (parcelle d'observation E70) en fonction de la réserve utile du sol. / Variations in stomatal conductance (observation plot E70) depending on the soil water reserve.

Ochs, 1978), (tableau 2, page 56 et figure 7A).

$$HV (pF 4,2) = 0,34 * \text{taux d'argile} + 0,76 \quad (r^2 = 0,99^*)$$

En revanche, le DED est corrélé négativement avec ce taux d'argile (figure 7B), (Ochs et Olivin, 1965).

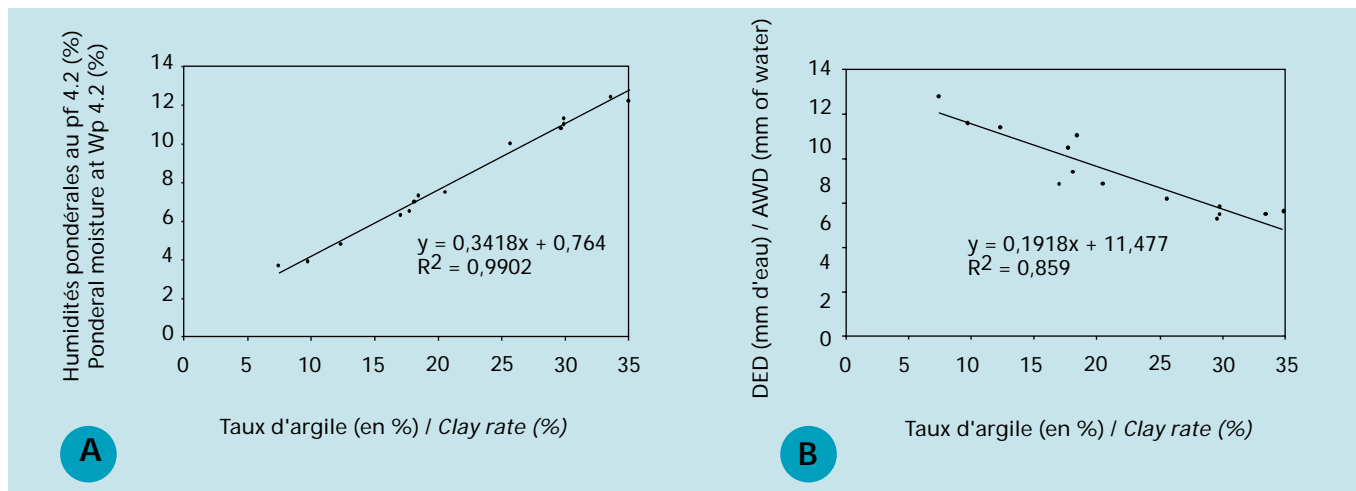
$$DED = -0,19 * \text{taux d'argile} + 11,5 \quad (r^2 = 0,86^*)$$

Les humidités minimales utilisées comme plancher du DED sont étroitement corrélées avec les humidités au pF 4,2 mesurées au laboratoire (figure 8).

$$HV (pF 4,2) = 0,95 * HV_{\min} + 5,16 \quad (r^2 = 0,89^*)$$

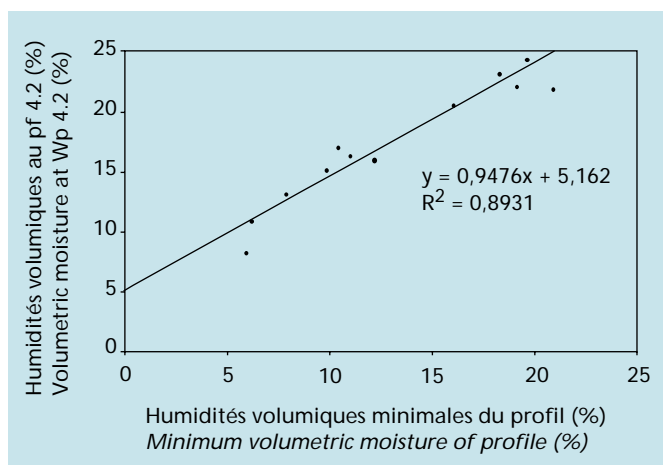
Le différentiel constant de 5 % environ pourrait vouloir dire que la palmeraie ne serait pas en mesure, dans son fonctionne-





**Figure 7A.** Relation entre les humidités pondérales au pF 4,2 et le taux d'argile des horizons du profil. / Relation between ponderal moisture values at pF 4.2 and the amount of clay in the profile horizons.

**Figure 7B.** Relation entre le DED et le taux d'argile des horizons du profil. / Relation between AWD and the amount of clay in the profile horizons.



**Figure 8.** Relation entre les humidités pondérales au pF 4,2 et les humidités volumiques minimales des profils hydriques. / Relation between ponderal moisture values at pF 4.2 and the minimum volumetric moisture values in the water profiles.

ment normal, de prélever l'eau du sol jusqu'au point de flétrissement couramment admis, en raison d'une possibilité de prélèvement en profondeur à des tensions plus faibles (tableau 2, page 56).

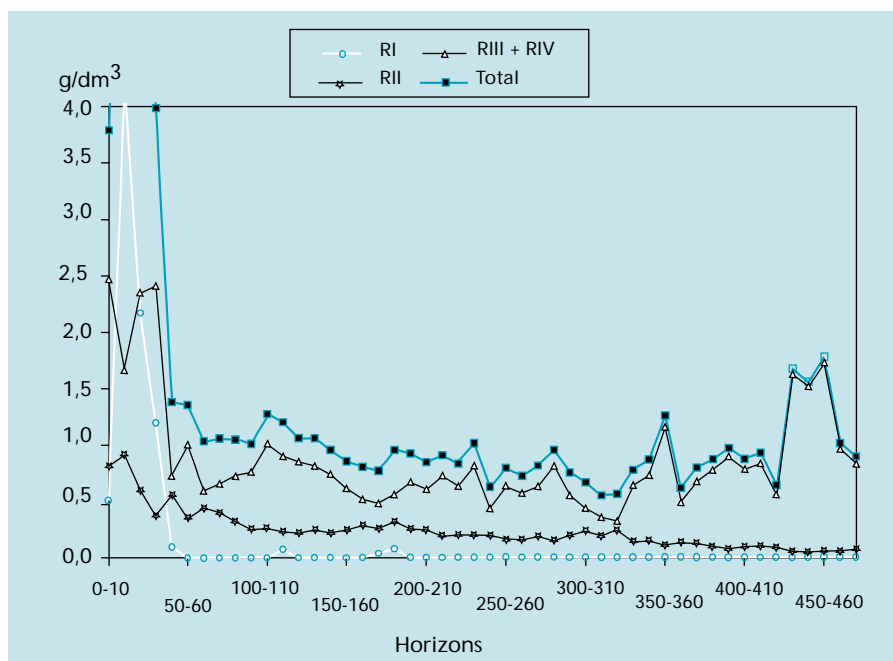
## Profils racinaires

Les racines primaires (RI) sont localisées en surface jusqu'à 60 cm de profondeur environ (dont 50 % avant 20 cm, Ruer, 1969). Des racines secondaires (RII) tertiaires (RIII) et quaternaires (RIV) descendent jusqu'à 4 m au moins (tableau 3, page 57 et figure 9), en décroissance progressive. La matière sèche des RIII + RIV, non séparées à l'observation, passe de 1 g dm<sup>-3</sup> en surface à 0,3 g dm<sup>-3</sup> à un mètre de profondeur pour décroître ensuite plus régulièrement à moins de 0,1 g dm<sup>-3</sup> à partir de 3 m environ. Le poids total sec des racines du profil ramené à une surface horizontale de 1 dm<sup>2</sup> représente 31,5 g, soit une biomasse considérable de 31,5 t de matière sèche par hectare de palmeraie.

Le gradient de consommation d'eau, qui décroît avec la profondeur à tension d'eau équivalente et même à contre gradient, est à mettre en parallèle avec le gradient des concentrations racinaires : le flux d'absorption augmente avec la densité de racines, au moins jusqu'à ce que l'humidité du sol ait atteint sa valeur minimale en surface. L'absorption d'eau se déplace alors vers la profondeur dans des couches plus humides mais moins riches en racines.

## Conclusion

L'exploitation des résultats du tube T13 permet de décrire l'évolution des profils hy-



**Figure 9.** Profils racinaires par types sur fosse pédologique dans la parcelle d'observation E70. / Root profiles per type in pedological trenches in observation plot E70.

driques sous palmeraie adulte jusqu'à une profondeur supérieure à 5 m grâce à l'utilisation d'une sonde radiométrique.

L'évapotranspiration réelle (ETR) moyenne de la palmeraie dans les conditions expérimentales est voisine de  $2,5 \text{ mm j}^{-1}$ . Elle est comprise entre 0,6 et  $4,6 \text{ mm j}^{-1}$  au cours de la saison sèche durant laquelle les palmiers réduisent leur consommation lorsque les horizons de surface s'assèchent. Ils peuvent poursuivre les prélèvements en profondeur (probablement au-delà de 5 m) grâce à l'extension du système racinaire et peut-être aux remontées capillaires. En fin de saison sèche, la consommation d'eau s'effectue principalement en surface dès que des pluies surviennent. Au cours de la saison des pluies, les précipitations relative-

ment intenses entraînent probablement des ruissellements même sur un terrain plat, ainsi que des phénomènes de drainage en profondeur, ce qui empêche de calculer l'ETR. Des dispositifs adaptés devraient être utilisés pour quantifier ces phénomènes. Le DED défini dans nos conditions expérimentales atteint 251 mm pour 5,15 m de profondeur. Cette valeur est probablement sous-estimée à cause des prélèvements possibles au-delà de cette profondeur et, peut-être aussi, à cause du seuil d'humidité minimale retenu dans notre calcul de DED qui se situe en deçà du point de flétrissement pF 4,2 mesuré au laboratoire. Des observations d'humidité au-delà de 5,15 m sont à envisager, mais des mesures tensiométriques qui pourraient apporter

des enseignements sur les flux hydriques à ces profondeurs sont irréalisables. En revanche, une saison sèche plus sévère que celle observée dans nos expériences pourrait nous renseigner sur les humidités minimales des horizons du sol dans lesquels les palmiers peuvent encore prélever de l'eau.

Grâce aux mesures de conductance stomatique et à la comparaison de ces valeurs avec celle de la part du DED restant utilisable (RU), il a été démontré que la RFU serait d'environ 70 % du DED, soit 175 mm. Il sera nécessaire de préciser le seuil à partir duquel les palmiers réagissent à la dessiccation du sol, ainsi que les bornes (capacité au champ et point de flétrissement) qui définissent le DED. ■

### Bibliographie / References

- ANON., 1969. Recherches sur l'économie de l'eau à l'I.R.H.O. L'eau et la production du palmier à huile. *Oléagineux* 24 (7) : 389-394.
- DUFRENE E., 1989. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université Paris XI, Orsay, France, 169 p.
- DUFRENE E., DUBOS B., REY H., QUENCEZ P., SAUGIER B., 1992. Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficits. *Acta Oecologica* 13 (3) : 299-314.
- MICHAUX P., 1951. L'économie de l'eau dans les cultures tropicales d'oléagineux. *Oléagineux* 6 (8-9) : 449-457.
- OCHS R., 1963. Recherches de pédologie et de physiologie pour l'étude du problème de l'eau dans la culture du palmier à huile. *Oléagineux* 18 (4) : 231-238.
- OCHS R., OLIVIN J., 1965. Réserve en eau d'une palmeraie adulte. *Oléagineux* 20 (4) : 231-235.
- OCHS R., OLIVIN J., REY H., DUFRENE E., QUENCEZ P., 1988. Bilan d'eau de la culture du palmier à huile en milieu tropical humide. A.T.P. PIREN : influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. Rapport final juin 1986-juin 1989. Montpellier, France, Cirad-CP, p. 317-345 (document interne).
- OLIVIN J., OCHS R., 1978. Propriétés hydriques des sols et alimentation en eau des oléagineux pérennes en Afrique de l'Ouest. *Oléagineux* 33 (1) : 1-12.
- QUENCEZ P., 1968. Etude du bilan d'eau en palmeraie. Mémoire ORSTOM, France, 42 p. (document interne).
- REY H. 1989a. Etude méthodologique d'étalonnage d'une sonde radiométrique SOLO 40 de Nardeux. Montpellier, France, Cirad-IRHO, document n° 2143, 40 p. (document interne).
- REY H., 1989b. Analyse et exploitations des profils hydriques sous palmeraie. Exemple du tube d'accès T13. Montpellier, France, Cirad-IRHO, document n° 2146, 50 p. et annexes, 54 p. (document interne).
- RUER P., 1969. Contribution à l'étude du système racinaire du palmier à huile. Thèse de docteur ingénieur, université de Paris, France, 116p.
- SURRE C., 1968. Les besoins en eau du palmier à huile. Calcul du bilan de l'eau et ses applications pratiques. *Oléagineux* 23 (2) : 165-167.
- WORMER T.M., OCHS R., 1959. Humidité du sol, ouverture des stomates et transpiration du palmier à huile et de l'arachide. *Oléagineux* 14 (10) : 571-580.

# Oil palm water profiles and water supplies in Côte d'Ivoire

H. Rey<sup>1</sup>, P. Quencez<sup>2</sup>, E. Dufrêne<sup>3</sup>, B. Dubos<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> CIRAD-GERDAT-AMAP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

<sup>2</sup> CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

<sup>3</sup> Laboratoire d'écologie végétale, faculté des sciences, université Paris XI Orsay, Bat. 362, 91405 Orsay Cedex, France

**W**ater supply is the main factor limiting oil palm yields in West Africa. As early as the 1950s it was the subject of numerous studies (Michaux, 1951; Wormer and Ochs, 1959), continued by Ochs (1963) and Quencez (1968). IRHO<sup>(1)</sup> (Anon., 1969) then embarked upon a systematic approach to oil palm functioning with Ochs *et al.* (1988) and Dufrêne (1989), which has been continued by the CIRAD-CP<sup>(2)</sup> Oil Palm Programme. In this approach, studies of water supplies in the oil palm plantation system are paramount. This study was carried out in an experimental plot at the La Mé station in Côte d'Ivoire. In addition to climatic factors and observations of the oil palms, soil water profiles were also monitored on a weekly basis through measurements taken with a neutron moisture meter in wells to a depth of 5 m. Use of a neutron probe, for soil volumetric moisture (VM) measurements, combined with a gamma ray probe for bulk density measurement, required a calibration methodology study, the results of which were used in the water profile study (Rey, 1989a). A water balance was drawn up using variations in soil water stocks (Rey, 1989b). Estimates of true evapotranspiration (TET) from the plant cover were deduced. The available water domain (AWD) was calculated under observation conditions. Changes in the soil water reserve (UR) were studied during drying then rehydration phases. The reaction of oil palms to the soil's water status was judged by measuring stomatal conductance (gs). The easily usable reserve (EUR) was estimated according to the AWD. The physical characteristics of the soils and the root profiles down to a depth of 5 m provided information for checking the hypotheses put forward concerning water retention by the soil and oil palm water consumption and behaviour.

## Design, material and methods

The elementary plot chosen for this study belonged to a flat and uniform planting in E70 (1973) on sandy acid ferrallitic soils representative of the tertiary sediments in Côte

d'Ivoire. It consisted of 16 useful palms of the LM2T x DA10D progeny, largely represented in the experimental network and in commercial plantations and smallholdings.

The water profiles were measured in 10 cm steps, usually on a weekly basis, using a Nardeux SOLO 40 radiometric probe. Aluminium access tubes were installed vertically in the soil: twelve 3-m long tubes were installed to study any spatial variations within the equilateral triangle planting design; one 6-m tube (T13) positioned in the centre of a triangle completed the series when it was noticed that the palms were able to draw water from a depth well below 3 m. This study concentrated on the results in tube T13 since it was verified (Rey, 1989b) that the variations in humidity measured in that tube were comparable to those measured in the 12 3-m tubes in their common section. The SOLO 40 radiometric probe uses two sources of radiation (neutrons and gamma rays), a sensor sensitive to volumetric moisture and another sensitive to the bulk density of the soil. The calibration and calculation methods proposed by the manufacturer Nardeux and the CEA<sup>(3)</sup> Cadarache, intended for soils in temperate regions, had to be checked for reliability when applied to tropical soils, especially to the ferrallitic soil on which the trials took place. Rey (1989a) carried out a methodological calibration study. Observations made on soil core samples when the 6-m access tube was installed, then in the nearby 6-m deep pedological trench and, lastly, in the tube, were used to establish correlations between ponderal moisture and bulk density measurement and the neutron and gamma ray readings. The results of this gravimetric calibration were preferred for application to the general study. In the same pedological trench, the root profile of the palms was obtained by taking four sets of soil samples in 10 cm thick slices (unit volume 4 dm<sup>3</sup>) at 10 cm intervals. The dry weights of primary (RI), secondary (RII) and higher order (RIII + RIV) roots were measured. Mean soil samples per uniform horizon were made up to analyse the physical characteristics. The water behaviour of the oil palms in the vicinity of tube T13 was studied weekly, at the same time as soil moisture, by measuring stomatal conductance (Dufrêne *et al.*, 1992) with a DeltaT Devices MKII porometer. On each observation day, the observations were carried out on one palm at

least five times on two leaflets in the central section of leaves of ranks 7, 8, 9 - 16, 17, 18 - 24, 25, 26, i.e. at three levels in the crown and in three directions.

## Water balance - true evapotranspiration (TET)

Throughout the entire 1988 dry season up to the beginning of May, the profile dried out continually from the surface downwards (table 1) and only non-saturating upward movement of water was possible. From 10th May to 7th July 1988, heavy rain at the start of the main rainy season moistened the profile surface, then deeper down, though the moisture front never reached the depth of 5.15 m, which was the observation limit. Up to 7th July 1988, it was therefore possible, in the absence of water loss through drainage, to estimate TET in the oil palm planting between two observation dates by adding the amount of water received through rainfall (R) to that taken from the soil. The latter value was evaluated as the difference in the quantities of water (D stock) contained in the soil profile between the beginning and end of the period in question (calculated in millimetres):

$$TET = R - (D \text{ stock}).$$

Nevertheless, this was an estimation by default, since an examination of soil drying profiles showed that water was taken from beyond 5.15 m, which could not be taken into account for lack of measurements.

Hence, the TET calculated in this way on a weekly basis (table 1) varied from 0.6 to 4.6 mm day<sup>-1</sup> during the dry season, around a mean value of 2.5 mm day<sup>-1</sup>. It increased when the heavy rains began, reaching abnormally high values that could not be accepted (e.g. 10.7 mm day<sup>-1</sup> from 26th May to 2nd June). It has to be said that TET estimation by this method was biased by rainwater loss through runoff and/or deep drainage, despite the absence of any notable slope in the observation plot.

Only the TET measured in the dry season could therefore be used (figure 1 for a monthly basis), before the figures became unreliable due to runoff, or later by drainage. Fortunately, the dry season TET values were the most interesting, since they could subsequently be used to study the effect of plant resistance to evapotranspiration from the plant cover (stomatal conductance measurements).

<sup>1</sup> Former Institut de recherches pour les huiles et oléagineux.

<sup>2</sup> Tree Crops Department of the Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

<sup>3</sup> French Atomic Energy Agency.



Tableau 1. Bilan hydrique de la parcelle d'observation. / *Water balance in the observation plot.*

Année Year	Période Period	Date Date	Stock Reserve mm	Pluie Rainfall mm	ETR m. (h) TET M. (w) mm	ETR m. (m) TET M. (m) mm	RU UR (% DED) (% AWD)	gs mm*s-1
87	Décembre / December	11-déc	1147,6					69,9
		15-déc	1148,4	0,0			70,2	6,9
		22-déc	1139,4	4,5	1,9		66,6	
87	Décembre / December	30-déc	1111,9	0,0	3,4	2,1	55,5	5,7
88	Janvier / January	5-jan	1091,6	0,0	3,4		47,3	5,0
		12-jan	1074,9	0,0	2,4		46,6	2,4
		19-jan	1056,2	0,0	2,7		33,1	6,6
		26-jan	1042,0	0,0	2		27,4	4,8
	Janvier / January	2-fév	1028,7	0,5	2	2,5	22,0	4,6
	Février / February	9-fév	1016,1	6,1	2,7		17,0	3,9
		18-fév	1009,5	0,4	0,8		14,3	2,6
		23-fév	995,1	3,4	3,5		8,5	1,3
	Février / February	1-mar	994,9	4,0	0,6	1,7	8,4	2,0
	Mars / March	8-mar	1018,9	56,4	4,6		18,1	3,1
		15-mar	1037,5	40,2	3,1		25,6	3,3
		22-mar	1013,9	6,4	4,3		16,1	
	Mars / March	29-mar	991,1	0,4	3,3	3,8	6,9	2,0
	Avril / April	5-avr	987,2	16,7	2,9		5,3	3,0
		12-avr	991,3	16,5	1,8		7,0	1,4
		19-avr	979,3	2,7	2,1		2,1	0,9
		26-avr	977,5	9,8	1,6		1,4	1,1
	Avril / April	3-mai	982,8	22,2	2,4	2,2	3,5	3,2
	Mai / May	10-mai	985,7	22,2	2,8		4,7	2,7
		17-mai	1062,3	138,2	8,8		35,6	5,9
		26-mai	1048,1	36,8	5,7		29,8	6,3
	Mai / May	2-jun	1044,0	70,6	10,7	6,9	28,2	5,8
	Juin / June	9-jun	1102,4	84,4	3,7		51,7	6,5
		16-jun	1123,4	60,7	5,7		60,2	7,6
		23-jun	1146,2	46,6	3,4		69,3	6,1
	Juin / June	30-jun	1157,9	79,3	9,7	5,6	74,1	7,8
	Juillet / July	7-jul	1200,5	96,9	7,7		91,2	6,3
		11-jul	1296,4	133,5	drainage		129,8	
		14-jul	1247,1	0,0	"		110,0	6,7
		16-jul	1222,3	0,0	cc		100,0	
		21-jul	1202,0	10,6			91,8	4,9
88	Juillet / July	28-jul	1179,8	17,8			82,9	7,0

ETR m. (h) = évapotranspiration moyenne hebdomadaire / TET m. (w) = weekly mean evapotranspiration ; ETR m. (m) = évapotranspiration moyenne mensuelle. / TET m. (m) = monthly mean evapotranspiration; RU = réserve utilisable / UR = usable reserve; DED = domaine d'eau disponible / AWD = available water domain; gs = conductance stomatique / gs = stomatal conductance.

### Available water domain (AWD)

Remember that the quantity of water in the soil that can be used to supply plants is known as the available water domain (AWD). It corresponds to the water reserve between the field capacity (fc) and the wilting point (wp) throughout the thickness of soil accessible to the roots:  $AWD = VM_{fc} - VM_{wp}$ .

The field capacity (fc) corresponds to the residual moisture in a soil saturated with water, after gravitational draining of free water. The corresponding water profile was estimated using the drying off profile obtained after a very wet period followed by six days without rainfall.

The wilting point (wp) corresponds to a moisture level below which the roots can no longer extract water retained in the soil by tension values of around 16 bar (wp 4.2). The corresponding water profile was initially estimated by considering the minimum moisture level reached during the 1988 dry season, for each depth.

For this initial approach, the amount of water between these two profiles was considered to be the AWD (figure 2). Figure 3 shows volume distribution of the different phases making up the soil (solid, water, air), taking a constant porosity of 40% (porosity calculated at a true

density estimated at 2.6 and a constant bulk density of 1.6).

$$\text{Mean porosity} = 100 * (2.6 - 1.6) / 2.6 = 40\%.$$

The AWD, which was maximum at the surface with approximately 10 mm of reserve per 10 cm of soil, gradually decreased down to a depth of around 2 m, remaining stable thereafter at around 4 to 5 mm per 10 cm of soil (figure 2). Throughout the profile, the total reserve amounted to 251 mm of water down to a depth of 5.15 m, to which needs to be added the amount of water that the oil palm plantation was capable of taking up beyond that depth, but which it is not yet possible to estimate.

Tableau 2. Résultats d'analyses des sols de la parcelle d'observation E70 et humidités pondérales aux valeurs caractéristiques (pF 4,2, pF 3 et pF 2,5). / Soil analysis results for observation plot E70 and ponderal moisture levels for typical values (pF 4.2, pF 3 and pF 2.5).

Horizons	Humidités pondérales au Ponderal moisture at			Argile Clay	Limons fins Fine loam	Limons grossiers Coarse loam	Sables fins Fine sand	Sables grossiers Coarse sand
cm	pF / wp 4.2	pF / wp 3	pF / wp 2.5					
0-20	3,7	4,7	5,7	7,4	3,7	1,9	19,9	67,1
20-40	3,9	5,0	6,1	9,7	2,4	1,6	19,8	66,4
40-60	4,8	6,1	7,1	12,3	2,2	1,7	20,1	63,7
60-80	7,3	8,2	9,4	18,4	2,2	1,8	16,5	61,2
80-100	6,5	7,6	9,5	17,7	2,4	2,0	15,8	62,0
100-130	7,0	8,8	10,2	18,1	2,5	2,0	17,5	59,8
130-160	6,3	8,1	9,2	17,0	2,5	1,1	18,7	60,7
160-210	7,5	9,0	10,5	20,5	2,8	1,7	21,8	53,2
210-260	10,0	12,0	12,6	25,6	2,5	1,6	16,7	53,6
260-310	12,4	15,0	16,6	33,5	2,2	2,0	15,1	47,2
310-360	10,8	12,9	14,6	29,6	2,2	1,1	19,0	48,2
360-410	11,0	13,0	14,4	29,8	2,5	1,7	17,0	49,0
410-460	11,3	13,3	14,5	29,8	2,1	1,7	18,0	48,3
460-510	12,2	14,1	16,1	34,9	1,5	1,7	16,1	45,8

### Variation in the usable reserve (UR)

If we now express soil moisture as a % of the AWD, a more representative value is obtained of the tension by which water is retained by the soil. This type of water profile representation more effectively portrays the uptake constraints encountered by roots.

The usable reserve (UR) is defined as being the percentage of the AWD usable by the plant. It decreased steadily from 70.2% to 1.4% between December 1987 and 26th April 1988, with a slight rise in March (table 1), following rainfall amounting to around 100 mm. The rehydration phase during the main rainy season followed this drying out period. The UR culminated at more than 100% on 11th July 1988, prior to the drainage phase, which led to field capacity on 16th July 1988. A new drying out cycle then occurred, corresponding to the beginning of the short dry season from 21st July 1988 onwards.

The first profile (figure 4A) occurred at around 70% of the AWD on the whole.

The profile gradually dried out in the absence of rainfall, taking on an almost rectilinear oblique form, whose slope increased with time (figure 4B).

Water uptake was therefore proportionally greater on the surface than deeper down, despite the resulting decreasing tension gradient.

When the surface horizons reached minimum humidity, water uptake could only occur deeper down, up to total, or almost total consumption of the AWD (figure 4C).

The first rains rehydrated the upper part of the profile (figure 4D).

The rehydrated zone then gradually extended downwards (figures 4E and 4F), whilst water

uptake occurred again preferentially in the upper horizons (figure 4G).

### Stomatal conductance (gs)

The daily stomatal conductance means (on leaf rank 17 representative of variations) varied in conjunction with the soil water reserve (figure 5), with a few irregularities, some of which were caused by a vapour pressure deficit (VPD) effect on stomatal opening (Dufrêne, 1989). That was the case, for example, on the day of 12th January 1988, during which the Harmattan, a dry wind from the Sahara which only affects southern Côte d'Ivoire for a few days per year, caused partial stomatal closure. Other irregularities were linked to the influence of dry season showers, which rehydrated the upper section of the profile, inducing temporary stomatal opening without substantially changing the soil water reserves.

Variations seen in stomatal conductance depending on the soil water reserve (figure 6) showed that, in practice, mean daily stomatal conductance remained at around a maximum of 6 to 8 mm s<sup>-1</sup> until the water reserve reached a limit of between 30 and 40% of the AWD. Beyond that limit, it decreased very rapidly, reaching zero when the AWD was entirely consumed (UR = 0).

The easily usable reserve (EUR) is the part of the water reserve (UR) that an oil palm plantation can use without leaf - atmosphere gas exchanges (transpiration, respiration and photosynthesis) being substantially affected. Under our experimental conditions, the EUR was thus apparently 70% of the AWD, i.e. 175 mm of water. Hence, it was apparently slightly lower than the 200 mm reserve adopted in the

simplified water balance model used to date by the CIRAD Oil Palm Programme (Surre, 1968).

### Soil analyses

There was a very good correlation between the humidity values at wp 4.2 measured in the laboratory and the profile clay rates (Olivin and Ochs, 1978), (table 2 and figure 7A).

$HV (wp 4.2) = 0.34 * \text{clay rate} + 0.76$  ( $r^2 = 0.99^*$ )

On the other hand, the AWD was negatively correlated to the clay rate (figure 7B), (Ochs and Olivin, 1965).

$AWD = -0.19 * \text{clay rate} + 11.5$  ( $r^2 = 0.86^*$ )

The minimum humidity values used as the AWD lower limit were closely correlated to the humidity values at pF 4.2 measured in the laboratory (figure 8).

$HV (wp 4.2) = 0.95 * HV \text{ min} + 5.16$   
( $r^2 = 0.89^*$ )

The constant differential of around 5% could mean that, under normal functioning conditions, the oil palm stand was unable take up water from the soil up to the commonly accepted wilting point, because of the possible uptake deeper down at lower tension levels (table 2).

### Root profiles

The primary roots (RI) were located in the surface horizon down to a depth of around 60 cm (50% above 20 cm, Ruer, 1969). Secondary (RII) tertiary (RIII) and quaternary (RIV) roots extended down to at least 4 m (table 3 and figure 9), gradually declining in numbers. The dry matter of RIII + RIV, which were not separated for observation, decreased from 1 g dm<sup>-3</sup> in the surface horizon to 0.3 g dm<sup>-3</sup> one metre down, decreasing more steadily thereafter to less than 0.1 g dm<sup>-3</sup> from around 3 m downwards. The total

dry weight of the roots in the profile expressed in terms of a surface horizon of 1 dm<sup>2</sup> came to 31.5 g, i.e. a considerable biomass of 31.5 t of dry matter per hectare of oil palm planting.

The water consumption gradient, which decreased with depth for an equivalent water tension, even at counter-gradient, had to be considered in relation to the gradient of root concentrations: the uptake flow increased with root density, at least until soil moisture reached its minimum value in the surface horizon. Water uptake then shifted downwards to the deeper layers, which were more humid but contained fewer roots.

### Conclusion

The results from tube T13 were used to describe the changes in water profiles under adult oil palm stands down to a depth of 5 m, using a radiometric probe.

The mean true evapotranspiration (TET) of the oil palm planting under experimental conditions was around 2.5mm day<sup>-1</sup>. In the dry season, during which the palms reduced their consumption when the surface horizons dried out, it was between 0.6 and 4.6 mm day<sup>-1</sup>. The palms may continue taking up water deeper down (probably beyond 5 m) through extension of the root system and maybe capillary rise. At the end of the dry season, water consumption is mainly in the surface horizon as soon as rainfall occurs. During the rainy season, relatively intense rainfall probably leads to runoff, even on flat land, along with deep drainage phenomena, making it impossible to calculate the TET. Appropriate devices need to be used to quantify such phenomena. The AWD defined under our experimental conditions reached 251 mm for a depth of 5.15 m. The value was probably underestimated because of possible uptake beyond that depth and maybe because of the minimum moisture threshold used in our AWD calculation, which was within the wilting point of wp 4.2 measured in the laboratory. Moisture observations need to be carried out beyond 5.15 m, but tensiometric measurements, which could provide information about water flow at those depths, are not feasible. On the other hand, a more severe dry season than that seen during our experiments could provide information about minimum moisture levels in the soil horizons from which oil palms can still take up water.

By measuring stomatal conductance and comparing the values to those of the proportion of AWD remaining usable (UR), it was shown that the EUR should be around 70% of the AWD, i.e. 175 mm. It will be necessary to ascertain the limit beyond which oil palms react to soil drying and to determine the boundaries (field capacity and wilting point) that define the AWD. ■

**Tableau 3. Profils racinaires par types sur fosse pédologique dans la parcelle d'observation E70. / Root profiles per type in pedological trenches in observation plot E70.**

Profils racinaires (poids sec moyen en g/dm <sup>3</sup> ) / Root profiles (mean dry weight in g/dm <sup>3</sup> )					
Horizons cm	RI	RII	RIII + RIV	Total	Cumul profil Profile total
0-10	0,51	0,81	2,46	3,78	3,78
10-20	4,17	0,91	1,66	6,74	10,52
20-30	2,17	0,60	2,35	5,12	15,64
30-40	1,19	0,37	2,41	3,98	19,62
40-50	0,10	0,56	0,72	1,38	21,00
50-60	0,00	0,35	1,00	1,35	22,35
60-70	0,00	0,44	0,59	1,03	23,38
70-80	0,00	0,40	0,65	1,05	24,44
80-90	0,00	0,32	0,72	1,04	25,48
90-100	0,00	0,25	0,76	1,01	26,48
100-110	0,00	0,26	1,01	1,27	27,75
110-120	0,07	0,23	0,89	1,20	28,95
120-130	0,00	0,21	0,84	1,05	30,00
130-140	0,00	0,25	0,81	1,05	31,05
140-150	0,00	0,22	0,73	0,95	32,00
150-160	0,00	0,24	0,61	0,85	32,85
160-170	0,00	0,28	0,51	0,80	33,65
170-180	0,04	0,25	0,48	0,76	34,41
180-190	0,08	0,32	0,55	0,95	35,36
190-200	0,00	0,25	0,66	0,92	36,27
200-210	0,00	0,24	0,60	0,84	37,11
210-220	0,00	0,18	0,72	0,90	38,01
220-230	0,00	0,20	0,63	0,82	38,84
230-240	0,00	0,20	0,80	1,01	39,84
240-250	0,00	0,19	0,43	0,62	40,46
250-260	0,00	0,16	0,63	0,79	41,25
260-270	0,00	0,15	0,56	0,72	41,96
270-280	0,00	0,19	0,62	0,81	42,77
280-290	0,00	0,14	0,80	0,95	43,72
290-300	0,00	0,20	0,54	0,74	44,46
300-310	0,00	0,23	0,43	0,66	45,12
310-320	0,00	0,19	0,35	0,54	45,66
320-330	0,00	0,24	0,31	0,56	46,22
330-340	0,00	0,13	0,63	0,77	46,98
340-350	0,00	0,14	0,72	0,86	47,85
350-360	0,00	0,10	1,15	1,25	49,10
360-370	0,00	0,13	0,48	0,61	49,71
370-380	0,00	0,12	0,67	0,79	50,49
380-390	0,00	0,09	0,77	0,86	51,36
390-400	0,00	0,07	0,89	0,96	52,31
400-410	0,00	0,09	0,77	0,86	53,18
410-420	0,00	0,10	0,82	0,92	54,10
420-430	0,00	0,09	0,55	0,63	54,73
430-440	0,00	0,05	1,61	1,66	56,40
440-450	0,00	0,04	1,51	1,55	57,95
450-460	0,00	0,05	1,72	1,77	59,72
460-470	0,00	0,05	0,95	1,00	60,72
470-480	0,00	0,07	0,82	0,89	61,61